S135 钻杆钢的拉扭复合加载疲劳行为

Biaxial Fatigue Behavior Under Combined Axial and Torsional Loading for S135 Drill Pipe Steel

雒设计[1,2],赵 康[1],王 荣[2]
(1 西安理工大学 材料科学与工程学院,西安 710048;
2 西安石油大学 材料科学与工程学院,西安 710065)
LUO She-ji[1,2],ZHAO Kang[1],WANG Rong[2]
(1 School of Materials Science and Engineering,Xi'an University of Technology,Xi'an 710048,China;2 School of Materials Science and Engineering,Xi'an Shiyou University,Xi'an 710065,China)

摘要: 采用疲劳实验和回归分析相结合的方法,研究了 S135 钻杆钢在拉扭复合加载条件下的疲劳行为,并对疲劳断口进行了微观分析。结果表明:当 $\tau_a/\sigma_{eq}=0.7$ 时,由拉扭应力幅对应的当量应力表示的疲劳寿命公式可很好地描述 S135 钻杆钢的拉扭疲劳寿命规律;疲劳断口由疲劳源区、疲劳裂纹稳定扩展区和快速瞬断区组成,疲劳裂纹从试样表面萌生,并向试样内部扩展,且常为多疲劳源,不同疲劳源断口的连接和复合加载形成所谓的"屋脊"状特征;拉扭疲劳断裂试样裂纹源区的微观断口特征为明显的河流花样,裂纹扩展区的微观断口特征为疲劳条带与涟波状花样。

关键词: S135 钻杆钢;双轴疲劳;同相位;拉扭复合加载;断口
doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.01.009
中图分类号: O346.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-4381(2013)01-0040-05

Abstract: Biaxial fatigue behavior under combined axial and torsional loading for S135 drill pipe steel was investigated by means of fatigue tests and data regression analysis methods, and the fracture surfaces were observed through scanning electron microscopy. The results show that when τ_a/σ_{eq} is 0.7 the fatigue life regulation of S135 drill pipe steel under combined axial and torsional loading can be represented well by the fatigue life equation, which is expressed by equivalent stress of tension-torsion stress amplitude. The fracture surfaces are mainly divided into three regions such as the crack initiation, steady crack propagation and instantaneous fracture. Fatigue cracks mainly initiate at the specimen surface and propagate rapidly in specimen. Fatigue cracks are multiple source and the so-called ridge patterns were formed by connecting the different fatigue source and combined loading. The fracture surfaces are characteristic of river patterns at crack initiation region, the fracture surfaces are characteristic of fatigue striation and rippled patterns at crack propagation region.

Key words: S135 drill pipe steel; biaxial fatigue; in-phase; combined axial-torsional loading; fracture

钻杆是石油、天然气开采和地质勘探中的重要结构件,也是石油钻柱的主要构件。国内外油田均发生过大量的钻杆过早断裂事故[1-3],造成巨大经济损失。中国石油天然气管材研究所对近 10 年来的钻具断裂案例进行分析后,发现其中 85%以上的案例属于低应力脆断、疲劳或腐蚀疲劳。在钻杆钻进过程中,钻杆主要承受弯矩、扭矩、轴向应力以及内外压力作用,是典型复合或多轴载荷,其中大部分是变动的,具有疲劳载荷的性质。除此之外,还受到温度和环境介质的影响,服役条件非常苛刻,经常导致钻杆的损伤和失效,所以,钻杆的过早失效主要是由疲劳、腐蚀疲劳引起的[2-4]。

由于井眼的弯曲,形成"狗腿",或水平井钻进,钻杆在旋转过程中通过"狗腿"产生弯曲,钻杆不仅承受拉伸-压缩载荷,还要承受扭矩的作用,产生疲劳损伤[5,6]。失效分析表明:钻杆的宏观断口呈现台阶状,裂纹形成后的扩展偏离钻杆轴线的垂直方向[7]。因此,钻杆的疲劳目前被认为是Ⅰ-Ⅲ型复合加载引起的[8,9]。

本工作通过疲劳实验测定了 S135 钻杆钢光滑试样在拉扭复合加载下的疲劳寿命,应用回归分析方法获得了 S135 钻杆钢的疲劳寿命曲线,并对断裂试样的

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

断口进行了宏观和微观分析。

1 实验材料与方法

实验材料为 S135 钻杆钢，其化学成分（质量分数/%）：0.32 C，0.24 Si，0.75 Mn，0.007 P，0.004 S，1.02 Cr，0.17 Mo，0.006 Ti，0.06 Cu，余量 Fe。沿钻杆纵向取样的力学性能指标为 $\sigma_{t0.7}=1112\text{MPa}$，$\sigma_b=1197\text{MPa}$，$\delta=17.5\ \%$，$C_v=47.0\text{J}$（20℃）。该钻杆的供货状态为调质热处理，其光学显微组织为典型的回火索氏体组织，如图 1 所示。疲劳试样沿钻杆的纵向取样，试样的长度方向为钻杆纵向，取样加工成直径 $\phi=5\text{mm}$ 的圆棒疲劳试样，如图 2 所示。

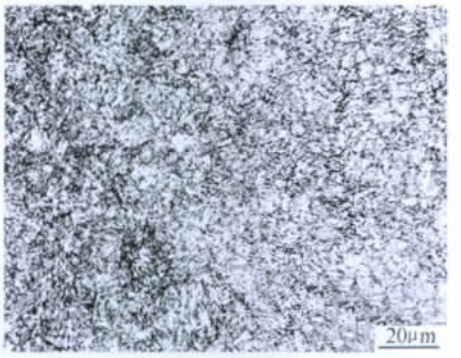


图 1 S135 钻杆钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of S135 drill pipe steel

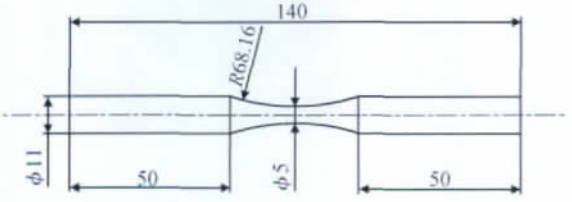


图 2 疲劳试样尺寸

Fig. 2 Schematic illustration of the fatigue specimen

拉扭疲劳实验在 PLD-50KN-250NM 型拉-扭电液伺服疲劳试验机上进行，采用对称加载，即加载的拉应力比 $R_\sigma=-1$，加载的切应力比 $R_\tau=-1$，且为同相比例加载，相位角为 0°，加载的 $\tau_a/\sigma_{eq}=0.7$[10,11]，加载频率为 3Hz，加载波形为三角波，实验环境为实验室大气。

拉扭疲劳断裂试样的断口在 JSM6390A 型扫描电镜（SEM）上进行观察和分析，以鉴别疲劳断裂的微观机制。

2 实验结果与分析

2.1 拉扭疲劳寿命与 S-N 曲线

图 3 为 $\tau_a/\sigma_{eq}=0.7$ 时，拉扭复合加载下疲劳断裂寿命随拉压应力幅值的变化关系。可见，随着拉压应力幅值的降低，疲劳寿命呈明显的升高趋势。当拉压应力幅值降低到约 550MPa 时，疲劳寿命超过 10^5 循环次数，随着拉压应力幅水平的降低，疲劳寿命显著延长，呈现疲劳极限的特征。当拉压应力幅值降低到 500MPa 以下时，疲劳寿命接近 10^7 循环次数，趋于无限寿命。

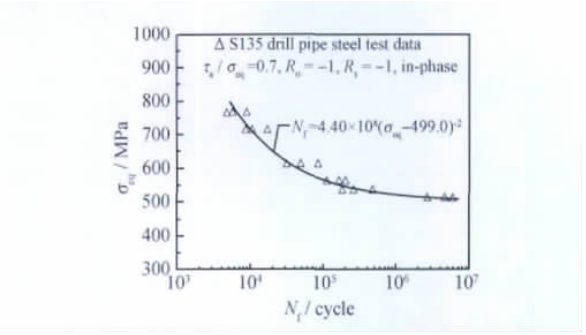


图 3 拉扭疲劳实验结果和拟合曲线

Fig. 3 Testing results and fitting curve of tension-torsion fatigue lives

文献[12]基于应变疲劳理论，给出了全寿命范围对称循环应力疲劳寿命公式：

$$N_f=A(S_a-S_c)^{-2} \tag{1}$$

式中：S_a 为循环应力幅；A 为应力疲劳抗力系数；S_c 为理论应力疲劳极限。当 $S_a>S_c$ 时，为有限疲劳寿命；当 $S_a\leqslant S_c$ 时，疲劳寿命趋于无限。

在拉扭复合加载疲劳实验时，有效应力是控制疲劳寿命的主要因素，可合理地用有效应力幅 σ_{eq} 和拉扭复合加载疲劳极限 $(\sigma_{eq})_c$ 分别替代式（1）中的 S_a 和 S_c，得到拉扭复合加载疲劳全寿命公式：

$$N_f=A''[\sigma_{eq}-(\sigma_{eq})_c]^{-2} \tag{2}$$

式中：A'' 为拉扭复合加载疲劳抗力系数。当 $\sigma_{eq}>(\sigma_{eq})_c$ 时，为有限拉扭复合加载疲劳寿命；$\sigma_{eq}\leqslant(\sigma_{eq})_c$ 时，拉扭复合疲劳寿命趋于无限，所以 $(\sigma_{eq})_c$ 可称为理论拉扭复合加载疲劳极限。

等效应力幅 σ_{eq} 可按式（3）计算[12,13]：

$$\sigma_{eq}=\sqrt{\frac{1}{2(1-R)}}\Delta\sigma=\sqrt{\frac{1}{2(1-R)}}\sigma_{max}(1-R) \tag{3}$$

式中：$\Delta\sigma$，σ_{max} 和 R 分别为疲劳实验加载的应力范围、最大应力和应力比。

对式（2）两边取对数可得：

$$\lg N_f=\lg A''-2\lg[\sigma_{eq}-(\sigma_{eq})_c] \tag{4}$$

在 $\lg N_f$-$\lg[\sigma_{eq}-(\sigma_{eq})_c]$ 双对数坐标中，式（4）代表一条斜率为 −2 的直线。利用尾差法原理，编制一个线性

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

回归计算机程序，在斜率为 -2 ± 0.004 的条件下可求得拉扭复合加载疲劳抗力系数 A'' 和理论拉扭复合加载疲劳极限 $(\sigma_{eq})_c$。应该指出，采用拟合方法所得到的理论疲劳极限与 GB/T 3075－2008 中规定的采用升降法所获得的疲劳极限有所差别，拟合方法所获得的理论疲劳极限略低于升降法所获得的疲劳极限[12]。

按以上方法，回归分析了 S135 钻杆钢拉扭复合加载疲劳寿命的实验结果，回归分析结果列于表 1。

表 1 S135 钻杆钢拉扭复合加载疲劳寿命回归分析结果

Table 1 Fitting results of fatigue test under combined axial and torsional loading for S135 drill pipe steel

A''/MPa^2	$(\sigma_{eq})_c$/MPa	r	s
4.4×10^8	499	−0.9773	0.2453

应用相关系数检验表明，拉扭复合加载疲劳回归分析的线性相关系数 $|r|=0.9773$，大于 99% 置信度对应的起码值 0.798。因此，式(1)可很好地用来描述 S135 钻杆钢拉扭复合加载疲劳寿命的一般规律。将表 1 中的疲劳抗力系数 A'' 和拉扭复合加载疲劳极限 σ_{eq} 值代入式(1)中可得到拉扭疲劳寿命的具体公式：

$$N_f = 4.40\times10^8(\sigma_{eq}-499.0)^{-2} \quad (5)$$

将式(5)的曲线画在图 3 中。可见，实验结果与拟合曲线吻合良好。故应用式(2)可很好地描述拉扭复合加载疲劳寿命的一般规律。因此，只要知道钻杆结构承受的外力，就可以应用式(5)来计算构件的疲劳损伤。

2.2 拉扭疲劳断裂特征

图 4 为不同应力幅值下拉扭疲劳断裂试样的宏观断口形貌。可见，断口由疲劳源区、疲劳裂纹稳定扩展区和快速瞬断区三个部分组成，且疲劳源由于承受反复的拉压及扭转载荷的作用而呈现灰黑色，各区域所占比例的大小随应力幅值的变化而改变。在拉扭复合加载下，试样呈脆性断裂，断口无明显的塑性变形，且不是一个平整的表面，高低不平。在扭矩产生的剪切应力作用下，断面与试样轴向大致呈 45°，疲劳裂纹从试样表面形成，向试样内部扩展，且常为多疲劳源，不同疲劳源断口的连接和复合加载的作用形成所谓的“屋脊”状特征。

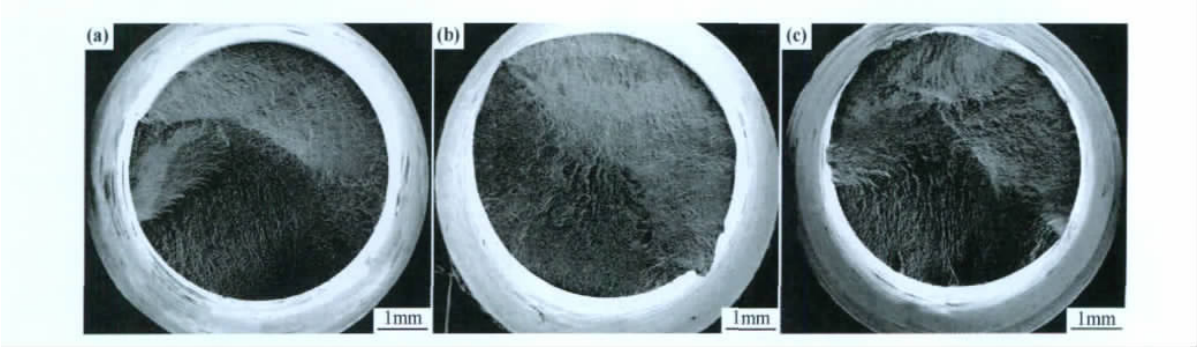


图 4 不同应力幅值下拉扭疲劳宏观断口形貌 (a)σ_{eq}=560.5MPa；(b)σ_{eq}=611.5MPa；(c)σ_{eq}=713.4MPa

Fig. 4 Macroscopic morphologies of fatigue fracture under combined axial and torsional loading at different stress amplitudes (a)σ_{eq}=560.5MPa；(b)σ_{eq}=611.5MPa；(c)σ_{eq}=713.4MPa

图 5 为不同应力幅值下拉扭疲劳断裂试样裂纹源区的断口形貌。可见，疲劳裂纹萌生于材料表面或靠近表面的位置。由于疲劳源区是最早生成的断口，在该区域内疲劳裂纹的扩展速率缓慢，裂纹反复张开闭合引起匹配断口表面的摩擦，通常需要经过多次循环才能形成，因此疲劳源区的断口通常比扩展区和瞬断区更平坦光滑。在断口上，裂纹从萌生点开始，以河流状花样向前扩展，在扩展中相遇，裂纹前沿因阻力不同而发生扩展方向上的偏离。此后，裂纹开始在各自的平面上继续扩展，不同的断裂面相互交割而形成台阶，这些台阶在断口上构成了放射状射线，随着应力幅值的增加，河流花样减少并出现擦伤痕迹。在该区域内观察不到疲劳条带，而且加载应力越大，这个区域的面积就越小。

图 6 为不同应力幅值下拉扭疲劳断裂试样裂纹稳定扩展区的断口形貌。可见，在裂纹稳定扩展区以穿晶断裂为主要特征。当拉应力幅 σ_{eq}=560.5MPa 时，裂纹为穿晶断裂，在断口中可观察到疲劳条带，疲劳条带与裂纹扩展方向垂直，断裂表面出现了明显的二次裂纹，与主裂纹呈一定角度。当拉应力幅 σ_{eq}=611.5MPa 时，裂纹也为穿晶断裂，断口表面由一些平行的条纹构成，条纹方向与裂纹扩展方向基本垂直，条纹边界不像疲劳条带那样明锐，排列也不如疲劳条带规则，断口表面呈明显的涟波状花样，断口上没有观察到疲劳条带。涟波状花样区域的大小与应力幅水平有关，随着应力半幅的增加，涟波状花样区域增加。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

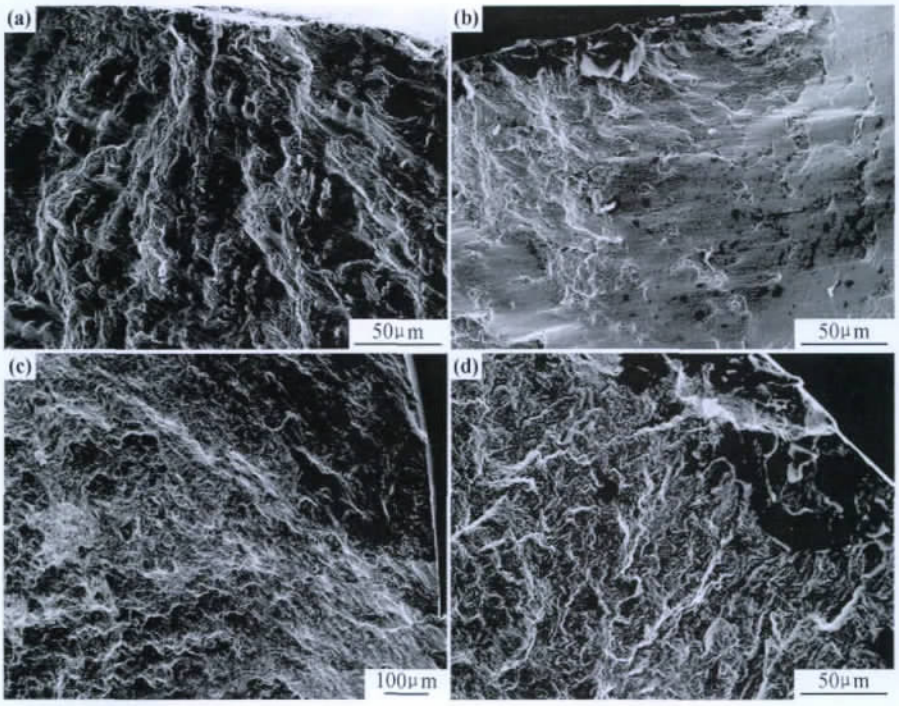


图 5 不同应力幅值下拉扭疲劳裂纹源区断口形貌 (a)σ_{eq}=560.5MPa;(b)σ_{eq}=611.5MPa;(c)σ_{eq}=713.4MPa;(d)σ_{eq}=764.3MPa

Fig. 5 Fracture morphologies of fatigue crack initiation region under combined axial and torsional loading at different stress amplitudes (a)σ_{eq}=560.5MPa;(b)σ_{eq}=611.5MPa;(c)σ_{eq}=713.4MPa;(d)σ_{eq}=764.3MPa

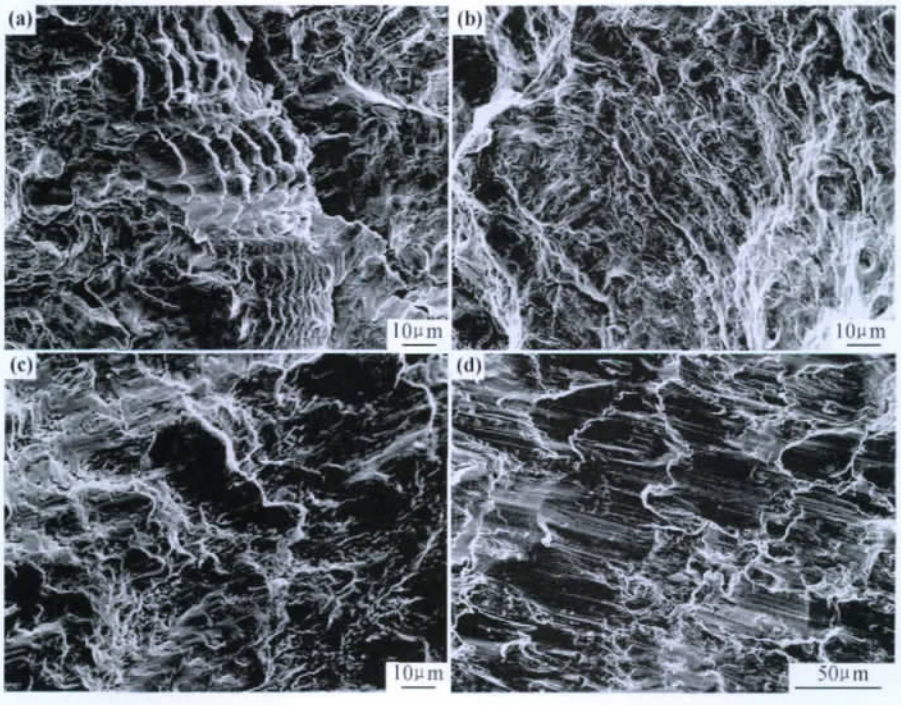


图 6 不同应力幅值下拉扭疲劳裂纹扩展区断口形貌 (a)σ_{eq}=560.5MPa;(b)σ_{eq}=611.5MPa;(c)σ_{eq}=713.4MPa;(d)σ_{eq}=764.3MPa

Fig. 6 Fracture morphologies of fatigue crack propagation region under combined axial and torsional loading at different stress amplitudes (a)σ_{eq}=560.5MPa;(b)σ_{eq}=611.5MPa;(c)σ_{eq}=713.4MPa;(d)σ_{eq}=764.3MPa

3 结论

(1)当切应力幅与拉压应力幅的比值为 0.7 时,由拉扭应力幅对应的当量应力表示的拉扭疲劳寿命公式 $N_f=4.40\times10^8(\sigma_{eq}-499.0)^{-2}$ 可很好地描述 S135 钻杆钢的拉扭疲劳寿命变化规律。

(2)在拉扭复合加载下,疲劳裂纹从试样表面形

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成，向试样内部扩展，且常为多疲劳源，不同疲劳源断口的连接和复合加载形成所谓的“屋脊”状特征。

(3)拉扭疲劳断口在裂纹源区的微观断口形貌特征为断口表面呈明显河流状花样，在裂纹扩展区的微观断口形貌特征为疲劳条带与涟波状花样。

参考文献

[1] 石油管材研究中心失效分析研究室. 1988 年全国油田钻具失效情况调查报告[R]. 西安：陕西科学技术出版社，1992. 327－336.

[2] LU Shuan-lu, FENG Yao-rong, LUO Fa-qian, et al. Failure analysis of IEU drill pipe wash out[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10－12): 1360－1365.

[3] DALE B A. An experimental investigation of fatigue crack growth in drillstring tubulars[J]. SPE Drilling Engineering, 1988, 3(4): 356－362.

[4] 李鹤林，李平全，冯耀荣. 石油钻杆失效分析及预防[M]. 北京：石油工业出版社，1999. 18－40.

[5] BARYSHNIKOV A, CALDERONI A, LIGRONE A, et al. A new approach to the analysis of drillstring fatigue behavior [J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(2): 77－84.

[6] HANSFORD J E, LUBINSKI A. Cumulative fatigue damage of drill pipe in dog-legs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18(3): 359－363.

[7] 刘永刚，苏建文，林凯，等. 一例 S135 钻杆本体断裂原因分析[J]. 石油矿场机械，2007，36(5)：58－61.

[8] MISCOW G F, DE MIRANDA P E V, NETTO T A, et al. Techniques to characterize fatigue behaviour of full size drill pipes and small scale samples[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(6): 575－584.

[9] FENG Miao-lin, DING Fei, JIANG Yan-yao. A study of loading path influence on fatigue crack growth under combined loading [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28 (1): 19－27.

[10] AKINIWA Y, STANZL-TSCHEGG S, MAYER H, et al. Fatigue strength of spring under axial and torsion loading in the very high cycle regime[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(12): 2057－2063.

[11] FROST N E, MARSH K J, POOK L P. 金属疲劳[M]. 汪一麟，邵本逑，译. 北京：冶金工业出版社，1984. 89－98.

[12] 郑修麟. 金属疲劳的定量理论[M]. 西安：西北工业大学出版社，1994. 35－41.

[13] 王荣，刘洋. 热处理工艺对 22Cr 双相不锈钢疲劳寿命的影响[J]. 机械工程材料，2009，33(8)：25－31.

收稿日期：2011-10-08；修订日期：2012-01-31

作者简介：雒设计(1979－)，男，讲师，博士生，从事材料的组织与性能、断裂方面的研究，联系地址：陕西西安市电子二路东段 18 号西安石油大学材料科学与工程学院(710065)，E-mail：sjluo@xsyu.edu.cn

(上接第 5 页)

[5] VICULIS L M, MACK J J, MAYER O M, et al. Intercalation and exfoliation routes to graphite nanoplatelets[J]. Journal of Materials Chemistry, 2005, 15(9): 974－978.

[6] TAPAS KUILLA, SANMBHU BHADRA, YAO Da-hu, et al. Recent advances in graphene based polymer composites[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(11): 1350－1375.

[7] STANKOVICH S, PINER R D, NGUYEN S T, et al. Synthesis and exfoliation of isocyanate-treated graphene oxide nanoplatelets [J]. Carbon, 2006, 44(15): 3342－3347.

[8] 向康，刘春华，王平华，等. 石墨烯纳米复合材料的制备及结构表征[J]. 高分子材料科学与工程，2011，27(10)：42－45.
XIANG Kang, LIU Chun-hua, WANG Ping-hua, et al. Preparation and structure characterization of graphene-based nano composite material[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(10): 42－45.

[9] 冯颖，黄世华，康凯，等. 石墨烯片的制备与表征[J]. 新型炭材料，2011，26(1)：26－30.
FENG Ying, HUANG Shi-hua, KANG Kai, et al. Preparation and characterization of graphene and few-layer graphene[J]. New Carbon Materials, 2011, 26(1): 26－30.

[10] 杨永岗，陈成猛，温月芳，等. 氧化石墨烯及其与聚合物的复合[J]. 新型炭材料，2008，23(3)：193－200.
YANG Yong-gang, CHEN Cheng-meng, WEN Yue-fang, et al. Oxidized graphene and graphene based polymer composites[J]. New Carbon Materials, 2008, 23(3): 193－200.

[11] 马文石，周俊文. 一种可分散性石墨烯的制备[J]. 高等学校化学学报，2010，31(10)：1982－1986.
MA Wen-shi, ZHOU Jun-wen. Preparation of a dispersible graphene[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2010, 31 (10): 1982－1986.

[12] 卢向军，窦辉，杨苏东，等. 自支撑石墨烯/聚苯胺纳米纤维薄膜的制备及其电化学电容行为[J]. 物理化学学报，2011，27(10)：2333－2339.
LU Xiang-jun, DOU Hui, YANG Su-dong, et al. Fabrication and electrochemical capacitive behavior of freestanding graphene/polyaniline nanofibre film[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(10): 2333－2339.

[13] 傅玲，刘洪波，邹艳红，等. Hummers 法制备氧化石墨时影响氧化程度的工艺因素研究[J]. 炭素，2005，(4)：10－14.
FU Ling, LIU Hong-bo, ZOU Yan-hong, et al. Technology research on oxidative degree of graphite oxide prepared by Hummers method[J]. Carbon, 2005, (4): 10－14.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51073098)
收稿日期：2012-04-05；修订日期：2012-05-02

作者简介：任小孟(1983－)，男，在读博士，主要从事外加物理场对碳材料影响研究，联系地址：四川省成都市一环路南一段 24 号四川大学高分子材料工程国家重点实验室(610065)，E-mail：rxiaomeng@yahoo.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net